

СОСТАВ МАГМ ИЗВЕРЖЕНИЯ 1996 г. КАРЫМСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА (КАМЧАТКА) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

© 2001 г. М. Л. Толстых*, В. Б. Наумов*, А. Ю. Озеров**, Н. Н. Кононкова*

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
117975 Москва, ул. Косыгина, 19

**Институт вулканологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9

Поступила в редакцию 18.06.99 г.

Исследованы расплавные включения во вкрапленниках базальта кальдеры Академии Наук (прорыв Новогодний, озеро Карымское) и андезитов вулкана Карымский последнего извержения 1996 г. Использованы методы гомогенизации включений и анализ стекол этих включений (>50) с помощью электронного микросонда. Содержания SiO_2 в расплавных включениях в плагиоклазе и оливине базальта изменяются от 47.4 до 57.1 мас. %, в плагиоклазе андезитов – от 55.7 до 67.1 мас. %. Расплавы базальта характеризуются обычными содержаниями FeO (11.4–6.8%), MgO (6.1–2.3%), CaO (10.8–6.7%), TiO_2 (1.3–0.7%), но обогащены Na_2O (7.4–2.9%, среднее 5.1%), причем самые высокие содержания Na_2O (7.4–5.3%) установлены в наиболее основных расплавах ($\text{SiO}_2 = 47.4\text{--}52.0\%$). Содержания K_2O изменяются от 0.4 до 1.7%. Определены концентрации летучих в базальтовом расплаве: в среднем 0.09% Cl и 0.14% S . Для расплавов андезитов характерны высокие содержания FeO (в среднем 6.5%), CaO (5.2%) и обычные содержания Na_2O (4.5%) и K_2O (2.1%). Концентрация Cl в расплаве составляла 0.26%, $\text{S} = 0.07\%$. Сравнение расплавов андезитов вулкана Карымский с ранее изученными нами расплавами андезитов вулканов Шивелуч и Безымянный показало существенное их различие. Первые, более основные, обогащены Fe , Ti , Ca , Mg , P , Na , значительно беднее калием. Скорее всего, расплавы Карымского вулкана являются менее дифференцированными по сравнению с расплавами вулканов Безымянный и Шивелуч.

Карымский – один из самых активных вулканов Камчатки – входит в одноименную группу, состоящую из 9 эруптивных центров (Карымский вулканический центр по [1]) и расположенную в центральной части Восточного вулканического пояса Камчатки, в 30 км от побережья Тихого океана и в 125 км к северу от г. Петропавловска-Камчатского. Особое внимание привлек к себе Карымский вулкан после извержения 1996 г., самого мощного за последние несколько сот лет. Извержение знаменательно и тем, что одновременно произошел выброс материала как среднего, так и основного составов. Множество статей посвящено детально зафиксированной динамике извержения, петрографии изверженных пород и их генетической связи [2–5 и др.]. В нескольких работах [6–8] указаны температуры гомогенизации расплавных включений в апатите и плагиоклазе из андезито-дацитов этого вулкана, которые оказались весьма высокими: 1440–1000°C. Только в одной работе [9] приведен состав расплава, полученный при исследовании необычных магматических включений с признаками ликвации в плагиоклазах из андезито-дацитов Карымского вулкана.

Цель настоящей работы заключалась в детальном изучении расплавных включений в плагиоклазах базальтов и андезитов последнего извержения 1996 г. Карымского вулканического центра для выяснения химического состава магматических расплавов и возможности генетической связи различных по основности пород. Кроме того, проведено сравнение химического состава расплавов андезитов Карымского вулкана с ранее изученными расплавами андезитов вулканов Шивелуч и Безымянный, что позволило выявить особенности каждого из них.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КАРЫМСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Вулкан Карымский относится к вулканам центральной части вулканической зоны Камчатки. Он расположен в голоценовой кальдере, наложенной на средне-верхнеплейстоценовые вулканы Двор и Пра-Карымский. Современная постройка представляет собой конус с абсолютной отметкой 1536 м, расположенный в центральной части кальдеры. Относительная высота конуса – 600 м, диаметр кратера – 200–250 м, площадь кальдеры – 12 км. На севере к кальдере примыкает построй-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) пород и стекол основной массы этих пород Карымского вулканического центра

Компонент	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	52.00	52.38	62.45	61.54	66.59	74.80	75.28
TiO ₂	0.73	0.78	0.92	0.86	0.50	1.06	0.83
Al ₂ O ₃	19.21	19.22	16.27	16.67	19.52	12.62	12.46
Fe ₂ O ₃	–	2.32	–	2.43	–	–	–
FeO	8.30*	5.92	6.58*	5.12	1.78*	3.59*	3.14*
MnO	0.14	0.13	0.15	0.11	0.06	0.10	0.11
MgO	5.34	5.14	2.01	1.99	0.23	0.18	0.49
CaO	10.47	10.52	5.38	5.31	4.65	0.92	0.94
Na ₂ O	2.80	2.54	4.52	3.69	5.76	1.88	1.77
K ₂ O	0.58	0.78	1.57	1.58	1.64	3.50	3.44
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.26	0.25	–	–	–
Cl	–	–	–	–	0.04	0.02	0.02
S	–	–	–	–	0.06	0.03	0.04
H ₂ O	–	0.11	–	–	–	–	–
Сумма	99.71	99.99	100.11	99.55	100.83	98.70	98.52

* Железо общее. Примечание. 1 – образец К-2, 2 – базальты (среднее из 20 анализов, данные из работ [3, 4]), 3 – образец К-4, 4 – андезиты (среднее из 6 анализов [3]), 5–7 – стекла основной массы (5 – образец К-2, 6 – образец К-4, 7 – образец К-63).

ка Двор, центральная часть которой залита лавами древнего вулкана Карымский. Дно кальдеры заполнено лавами молодого конуса.

Кальдера образовалась 7700–7800 лет назад в результате серии извержений пемзовой пирокластики. После образования кальдеры обрушения деятельность вулкана замерла почти на 2000 лет. Новая вспышка активности вулканического центра связана с образованием молодого стратовулкана в кальдере (~5300 лет назад) и продолжалась ~3000 лет. Мощные выбросы андезито-базальтовой и андезитовой пирокластики чередовались с излияниями андезитовых лав. Особенно мощные выбросы вулканического материала произошли 5100 и 4200 лет назад. После некоторого перерыва ~500 лет назад снова началась активизация вулкана, выражавшаяся в выбросах пирокластики и излияниях лав андезитового состава. Этот период активности продолжается и сейчас.

Последнее крупное извержение вулкана Карымский началось 2 января 1996 г. [3] и продолжается до настоящего времени. Процесс извержения можно разделить на 3 этапа. В течение первого этапа (2–3 января) происходило извержение из двух вулканических центров, находящихся на расстоянии 6 км друг от друга: из вершинного кратера вулкана Карымский и из Карымского озера (северный сектор) вулкана Академии Наук. Из главного кратера наблюдался непрерывный подъем газопеплового столба на высоту от 500 до 1200 м. От поднимающейся колонны на юг простирался темный шлейф, из которого постоянно про-

исходило выпадение тefры. Длина шлейфа достигала 50–70 км, склоны вулкана и борта кальдеры были покрыты мощным слоем пепла. В это же время в Карымском озере происходило подводное извержение из эруптивного центра, расположенного в 500 м от берега. Мощные дискретные фреато-магматические взрывы следовали друг за другом с интервалом 10–15 мин, парогазовые выбросы с примесью пепла поднимались на высоту нескольких км. При наиболее сильных взрывах происходил выброс большого количества бомб, а на поверхности озера наблюдались волны, достигающие высоты 10 м. Во время первого этапа извержения в Карымском озере сформировался полуостров Новогодний площадью 0.7 км².

Второй этап извержения (4–12 января 1996 г.) характеризовался эруптивной деятельностью только из вершинного кратера, при этом частота взрывов значительно уменьшилась: они происходили в среднем через 10 мин. Высота выбросов составляла 500–900 м, пепловые шлейфы тянулись на 50–60 км, главным образом в западном и восточном направлениях.

В течение третьего этапа (13 января 1996 г. – настоящее время) из главного кратера Карымского вулкана происходило последовательное излияние нескольких лавовых потоков. Длина самого мощного из них достигала 1.5 км, а высота фронтальной части – 25 м. В течение всего этапа из вершинного кратера наблюдалась эксплозивная деятельность. Парогазовые выбросы, нагруженные пеплом, поднимались на высоту от 100 до

Таблица 2. Представительные анализы (мас. %) плагиоклазов пород вулкана Карымский

Компонент	К-2	К-2	К-2	К-63	К-4	К-63	К-4	К-63	К-4*
SiO ₂	44.79	47.64	45.99	47.28	47.58	52.85	51.97	55.07	57.38
Al ₂ O ₃	34.35	33.66	31.76	32.21	31.65	30.47	28.76	27.31	26.68
FeO	0.62	0.59	0.60	0.87	0.75	0.66	0.71	0.67	0.86
CaO	18.09	17.10	17.98	16.68	17.41	14.51	14.07	12.37	8.49
Na ₂ O	0.99	1.56	2.23	1.78	2.65	3.36	4.31	4.64	5.86
K ₂ O	0.03	0.01	0.05	0.05	0.08	0.11	0.13	0.15	0.29
Сумма	98.87	100.56	98.61	98.87	100.12	98.04	99.95	100.21	99.56
An	90.8	85.8	81.4	83.6	78.1	70.0	63.9	59.1	43.7
Ab	9.0	14.1	18.3	16.1	21.5	29.4	35.4	40.1	54.6
Or	0.2	0.1	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.7

Примечание. К-4* – микролит, остальные анализы – вкрапленники.

Таблица 3. Представительные анализы (мас. %) темноцветных минералов пород вулкана Карымский

Компонент	1	2	К-2	К-2	К-63	3	К-4	К-63
SiO ₂	38.45	39.58	37.93	53.58	52.35	52.19	50.76	52.08
TiO ₂	–	–	0.00	0.49	0.34	0.47	0.63	0.53
Al ₂ O ₃	–	–	0.04	1.33	1.11	2.75	1.88	1.54
FeO	22.20	17.53	20.24	19.55	20.37	8.21	10.40	10.94
MnO	0.57	0.42	0.03	0.44	0.71	0.07	0.49	0.49
MgO	38.22	43.11	39.18	20.80	23.24	15.50	13.89	14.75
CaO	0.11	0.15	0.17	2.24	1.92	20.71	20.98	19.78
Na ₂ O	–	–	–	0.13	–	0.48	0.31	0.35
Cr ₂ O ₃	–	–	0.13	0.10	0.04	0.08	0.02	0.00
Сумма	99.55	100.79	97.72	98.66	100.08	100.46	99.36	100.46

Примечание. Анализы 1–3 – данные из работы [4].

500–600 м, формируя эруптивные облака. Частота выбросов менялась от нескольких минут до нескольких часов. При наиболее сильных эксплозиях (250 м и более) в их нижней части постоянно наблюдались раскаленные бомбы размером 1–2 м, значительно реже – до 4–5 м.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОРОД

Объектом наших исследований послужили три образца горных пород – продуктов извержения 1996–1997 г. г. Первый образец (К-2) – базальтовая вулканическая бомба с полуострова Новогодний, поступившая на поверхность 2–3 января 1996 г. Два остальных образца (К-4 и К-63) – андезиты лавовых потоков из вершинного кратера Карымского вулкана, отобранные в горячем состоянии 22.09.1996 и 19.08.1997, соответственно. Составы этих образцов, также как и средние составы базальтов и андезитов извержения 1996 г., приведены в табл. 1.

Базальт – черная пористая стекловатая порода с большим количеством фенокристаллов плагиоклаза. Количество вкрапленников составляет ~35% объема породы. Они представлены плагиоклазом, оливином и пироксеном. Основная масса имеет гиалиновую структуру, состоит из стекла и микролитов плагиоклаза, пироксена и рудного минерала. Состав стекла основной массы приведен в табл. 1.

Плагиоклаз преобладает во вкрапленниках (~80% всех вкрапленников), размеры его кристаллов варьируют от 0.3 до 3 мм. Крупные вкрапленники плагиоклазов часто содержат обширные внутренние зоны, подвергшиеся сильной резорбции. Плагиоклаз часто образует гломеропорфировые сростания. По составу он отвечает битовнитанортиту (An_{93-81}), в краевых зонах – лабрадору (An_{75-62} по данным [4]). Составы плагиоклазов, насыщенных расплавленными включениями, представлены в табл. 2 и на рис. 1а.

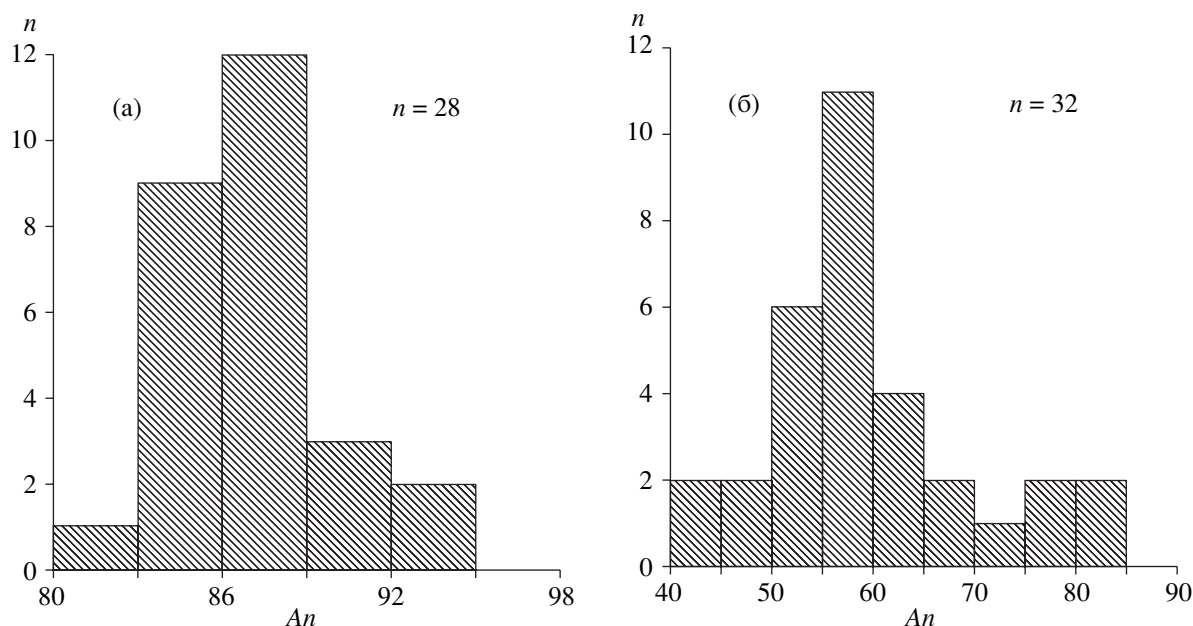


Рис. 1. Гистограммы составов плагиоклазов базальта (а) и андезитов (б) Карымского вулканического центра.

Оливин и пироксен встречаются реже. Оливин по составу отвечает Fo_{72-83} . Редко встречающиеся более магнезиальные разности относятся, по-видимому, к кумулятивным фазам, представляющим собой фрагменты алливалитовых включений, которые в общем характерны для пирокластических отложений Карымского вулканического центра [5]. В базальтах распространены как орто-, так и клинопироксен. Их составы представлены в табл. 3.

Акцессорные минералы базальтов – апатит и рудный минерал. Первый встречается лишь в виде кристаллических включений, а второй – в виде кристаллических включений и микролитов.

Андезиты – слабо пористые породы темно-серого цвета с количеством вкрапленников ~30–35%. Главным породообразующим минералом в них является плагиоклаз, содержание которого составляет ~85% от всех вкрапленников. В породах встречаются кристаллы оливина и пироксена (табл. 3). Основная масса сложена стеклом, микролитами плагиоклаза, пироксена и рудного минерала. Составы стекла основной массы приведены в табл. 1. Плагиоклаз представлен разноразмерными зернами, однако даже в крупных вкрапленниках зоны резорбции не отмечались. Диапазон составов плагиоклазов андезитов более значителен, чем у плагиоклазов базальта: An_{52-85} (табл. 2, рис. 1б). Акцессорные минералы андезитов те же, что и в базальте. Химический состав рудных минералов представлен в табл. 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Во вкрапленниках базальта и андезитов распространены кристаллические, флюидные и расплавные включения. Кристаллические включения – апатит и рудный минерал – одинаковы для всех вкрапленников. Флюидные включения представляют собой пузырьки разных размеров, темные и почти непрозрачные. В связи с малой плотностью включений определить состав флюида криометрическим методом не удалось. Расплавные включения можно подразделить на три типа по внешнему облику и расположению в кристаллах.

Включения первого типа характерны для вкрапленников как базальтов, так и андезитов. Включения чаще всего непрозрачные, удлинен-

Таблица 4. Представительные анализы (мас. %) рудных минералов пород вулкана Карымский

Компонент	К-2	К-4	К-63	К-4	К-4	К-4
FeO	52.25	78.05	78.09	81.86	93.26	92.90
TiO ₂	40.13	12.87	11.80	10.23	3.88	3.17
Al ₂ O ₃	0.43	3.35	3.26	3.12	1.66	1.30
MnO	0.29	0.42	0.45	0.53	0.45	0.45
MgO	3.18	1.91	2.69	2.04	1.18	1.11
CaO	0.04	0.06	0.13	0.03	0.03	0.06
SiO ₂	0.03	0.06	0.18	0.06	0.04	0.19
Cr ₂ O ₃	0.13	0.10	0.13	0.15	0.12	0.06
Сумма	96.48	96.82	96.73	98.02	100.62	99.24

Таблица 5. Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в плагиоклазах и оливине базальтов (обр. К-2) кальдеры Академии Наук

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	47.44	49.47	50.98	51.27	51.47	51.84	52.04	53.55	53.87	53.90
TiO ₂	0.73	1.08	0.79	0.91	0.95	0.87	1.02	1.08	1.01	1.30
Al ₂ O ₃	19.67	16.09	19.05	17.36	17.76	19.83	16.45	18.71	18.35	13.93
FeO	6.83	8.66	7.86	8.12	9.03	7.24	8.45	7.83	7.71	11.39
MnO	0.13	0.12	0.16	0.22	0.21	0.13	0.12	0.23	0.14	0.23
MgO	5.19	6.10	4.30	3.65	4.70	3.75	5.26	3.06	3.55	4.76
CaO	10.82	10.00	9.69	8.90	9.05	9.28	8.38	9.82	7.61	7.03
Na ₂ O	7.40	5.96	6.21	5.33	6.38	5.91	7.07	4.02	5.56	3.88
K ₂ O	0.44	1.13	0.66	1.07	0.66	0.74	1.40	0.92	0.94	1.25
P ₂ O ₅	0.09	0.24	0.15	0.16	0.16	0.16	–	0.19	0.22	0.24
Cl	0.07	0.12	0.10	0.06	0.08	0.07	–	0.09	0.09	0.11
S	0.14	0.19	0.16	0.15	0.10	–	0.22	0.19	–	0.11
Сумма	98.95	99.16	100.11	97.20	100.55	99.82	100.41	99.69	99.09	98.13
T, °C	1140	1140	1120	1140	1120	1100	1130	1100	1100	20
An	93	81	89	84	92	85	91	89	88	84
Компонент	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SiO ₂	54.11	54.68	54.87	55.44	55.44	55.47	55.62	55.75	57.14	53.30
TiO ₂	0.85	1.00	0.83	1.19	0.86	1.03	0.91	1.17	0.88	0.97
Al ₂ O ₃	16.42	17.30	14.41	16.23	17.67	17.62	18.59	16.05	17.97	17.38
FeO	8.90	7.70	8.98	8.96	5.45	8.08	6.85	9.79	7.29	8.17
MnO	0.21	0.15	0.14	0.15	0.09	0.21	0.16	0.19	0.17	0.17
MgO	4.63	3.68	6.59	3.92	3.72	3.63	3.61	5.10	3.50	4.35
CaO	8.16	8.12	8.21	6.66	8.15	7.24	7.90	7.34	7.46	8.43
Na ₂ O	4.43	6.05	4.60	5.15	2.64	3.09	4.84	3.50	2.87	5.08
K ₂ O	1.66	0.91	0.68	1.44	5.95	1.11	1.04	0.96	1.10	1.00
P ₂ O ₅	0.14	0.13	0.24	0.19	0.11	0.17	0.21	0.16	0.15	0.17
Cl	0.07	0.08	0.09	0.11	0.01	0.11	0.09	0.09	0.11	0.09
S	0.17	0.14	0.10	0.15	0.03	–	0.10	0.07	0.10	0.14
Сумма	99.58	99.94	99.74	99.59	100.12	97.76	99.92	100.17	98.74	99.25
T, °C	1120	1140	1140	1100	1140	20	1120	1159*	1120	
An	86	87	86	83	82	83	83		83	

Примечание. 1–17, 19 – плагиоклаз, 18 – оливин (*For* 76), 20 – среднее из 21 анализа.

* Расчетная температура равновесия оливина и расплава при $K_d^{\text{Fe-Mg}} = 0.30$.

ные, реже изометричные, правильных форм, разных размеров (от первых мкм до 30 мкм). Они полностью раскристаллизованы и содержат многочисленные рудные фазы. Стекловатые включения встречаются очень редко. Включения второго типа встречаются лишь в базальтах. Это мелкие непрозрачные включения, расположение которых очень четко приурочено к концентрическим зонам вокруг областей резорбции – ситовидного плагиоклаза с затеками бурого стекла. Включения третьего типа обнаружены также только в

базальте, образуют незональные скопления в совершенно чистых зернах плагиоклаза.

Термометрическое исследование расплавных включений проводилось в микромуфеле с платиновым нагревателем с точностью измерений $\pm 10^\circ\text{C}$, при этом использовался метод закалки [10]. Составы стекол расплавных включений получены на электронном микроанализаторе “Cam-e-bax Microbeam” при следующих условиях: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 30 нА, развертка

Таблица 6. Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в плагиоклазах андезита (обр. К-4) Карымского вулкана

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	55.70	56.67	58.33	61.68	62.26	63.01	63.60	64.13
TiO ₂	1.27	1.47	1.40	1.47	1.52	1.52	1.17	0.92
Al ₂ O ₃	15.87	15.36	15.09	14.20	14.44	14.48	15.37	15.38
FeO	8.15	8.54	7.54	7.75	7.41	7.69	6.18	5.60
MnO	0.14	0.46	0.21	0.21	0.24	0.22	0.16	0.17
MgO	2.74	2.70	2.15	2.00	1.87	1.77	1.86	1.57
CaO	6.45	6.81	6.60	5.34	5.02	5.30	4.55	5.07
Na ₂ O	5.82	5.71	5.94	4.65	4.29	3.24	4.39	4.06
K ₂ O	1.37	1.68	1.89	1.96	1.93	1.88	2.24	2.29
P ₂ O ₅	0.32	0.36	0.45	0.33	0.36	0.45	0.34	0.32
Cl	0.27	0.26	0.35	0.26	0.28	0.26	0.30	0.21
S	0.10	0.07	0.09	0.06	0.05	0.08	0.06	0.08
Сумма	98.20	100.09	100.04	99.91	99.67	99.90	100.22	99.80
T, °C	1100	1100	1100	1110	1110	1110	1110	1110
An	80	78	78	65	65	65	69	64
Компонент	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	64.30	64.70	64.73	65.21	65.46	65.75	65.78	62.69
TiO ₂	0.69	1.39	0.83	1.02	1.04	0.94	0.96	1.21
Al ₂ O ₃	16.30	14.06	15.46	14.64	15.70	14.13	15.05	15.09
FeO	4.08	6.03	4.72	4.48	4.65	4.93	5.33	6.27
MnO	0.12	0.20	0.14	0.20	0.11	0.18	0.20	0.20
MgO	1.05	1.48	1.07	1.06	1.26	1.18	1.39	1.70
CaO	4.97	4.40	4.97	3.66	4.47	3.62	4.39	5.08
Na ₂ O	4.96	3.98	4.96	4.18	4.12	3.65	3.65	4.51
K ₂ O	3.07	2.77	2.00	2.03	2.05	2.54	2.55	2.13
P ₂ O ₅	0.18	0.53	0.22	0.24	0.36	0.37	0.41	0.35
Cl	0.14	0.19	0.15	0.17	0.18	0.16	0.15	0.23
S	0.07	0.06	0.07	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07
Сумма	99.93	99.79	99.32	96.97	99.48	97.51	99.93	99.53
T, °C	1110	1110	1110	1100	1100	1100	1100	
An	58	58	59	53	53	55	53	

Примечание. 1–15 – анализы включений в плагиоклазах, 16 – среднее из 16 анализов.

в растр 12×12 , 5×5 и 2×2 мкм при исследовании стекол, 2×2 мкм при определении кристаллических фаз. Точность определения элементов при их содержаниях >10 мас. % составляла ± 2 отн. %, при содержаниях 5–10 мас. % – ± 5 отн. %, при содержаниях 1–5 мас. % – ± 10 отн. %. Следует отметить, что при анализе стекол включений в случае сканирования по малой площади установлена существенная потеря Na. Поэтому мы в нескольких крупных (30–50 мкм) включениях выполнили анализы стекол при различных площадях сканирования, что позволило рассчитать поправки в опре-

делении Na для небольших расплавных включений. Этот коэффициент оказался равным 1.4.

После нагревания вкрапленников плагиоклаза до температур 1100–1140°C и последующей быстрой закалки стекла расплавных включений выводились на поверхность кристаллов и анализировались на микрозонде. Результаты представлены в табл. 5 для включений в базальте и в табл. 6, 7 – для включений в андезитах. Для наглядности по этим результатам построены вариационные диаграммы зависимостей содержаний “SiO₂ – петрогенные элементы” соответственно для составов

Таблица 7. Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в плагиоклазах андезита (обр. К-63) Карымского вулкана

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	56.89	57.26	58.21	59.26	59.45	59.55	60.39	60.64
TiO ₂	2.25	1.71	1.70	1.33	1.47	2.11	1.60	1.29
Al ₂ O ₃	13.60	15.76	15.15	16.34	16.58	16.03	14.86	16.42
FeO	8.98	7.82	7.84	6.73	6.29	6.89	8.16	5.94
MnO	0.26	0.26	0.20	0.23	0.18	0.25	0.23	0.15
MgO	2.43	2.15	1.97	1.62	1.63	1.67	1.99	1.67
CaO	6.17	6.33	6.44	6.00	5.53	5.52	5.47	5.35
Na ₂ O	5.66	5.22	4.95	5.22	5.83	5.28	4.74	5.60
K ₂ O	1.80	1.79	1.74	1.75	1.84	1.81	1.77	1.67
P ₂ O ₅	–	1.16	1.23	0.89	0.36	0.46	0.28	0.39
Cl	0.38	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.30	0.25
S	0.12	0.15	0.13	0.06	0.05	0.09	0.13	0.07
Сумма	98.54	99.91	99.86	99.72	99.50	99.95	99.92	99.44
T, °C	1110	1110	1110	1110	1120	1110	1110	1120
An	84	84	84	60	78	60	84	78
Компонент	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	60.71	61.30	62.45	63.02	63.64	64.57	67.10	61.15
TiO ₂	1.69	1.35	1.22	1.58	0.98	1.14	0.90	1.48
Al ₂ O ₃	15.48	14.12	15.49	15.62	16.88	12.30	13.85	15.14
FeO	7.02	6.87	6.23	5.70	4.31	5.45	5.66	6.67
MnO	0.24	0.26	0.21	0.25	0.16	0.20	0.21	0.22
MgO	1.68	2.27	1.57	1.20	1.02	1.36	1.28	1.69
CaO	5.68	5.40	5.32	4.57	3.77	3.23	3.55	5.19
Na ₂ O	4.42	5.02	3.88	3.84	4.84	4.86	4.22	4.68
K ₂ O	1.77	1.89	2.12	1.94	3.10	2.85	2.21	2.03
P ₂ O ₅	0.59	1.16	0.46	0.45	0.59	0.47	0.33	0.62
Cl	0.33	0.33	0.29	0.21	0.31	0.21	0.20	0.29
S	0.06	0.09	0.06	–	0.07	0.04	0.08	0.08
Сумма	99.67	100.06	99.30	98.38	99.67	96.68	99.59	99.24
T, °C	1120	1110	1120	1120	1120	1120	1120	
An	70	84	70	78	58	52	59	

Примечание. 1–15 – анализы включений в плагиоклазах, 16 – среднее из 17 анализов.

пород, стекол расплавных включений и стекол основной массы этих пород (рис. 2).

Содержания SiO₂ в расплавных включениях в плагиоклазе и оливине базальта изменяются (здесь и далее содержания даны в мас. %) от 47.4 до 57.1%. Расплавы характеризуются обычными содержаниями FeO (11.4–6.8%), MgO (6.1–2.3%), CaO (10.8–6.7%), TiO₂ (1.3–0.7%), но обогащены Na₂O (7.4–2.9%, в среднем 5.1%), причем самые высокие содержания Na₂O (7.4–5.3%) установлены для самых основных по SiO₂ расплавов (47.4–52.0%).

Содержания K₂O изменяются от 0.4 до 1.7%. Исключение составляет одно включение, в котором содержание K₂O (5.95%) значительно выше, чем Na₂O (2.6%). Отметим, что это существенно калиевое включение не содержит Cl, в то время как в остальных 20-ти включениях концентрация Cl составляет 0.06–0.12% при среднем 0.9%. Такая особенность калиевых расплавов в отношении хлора была нами установлена ранее в расплавах вулканитов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) [11] и в кислых расплавах Верхнеу-

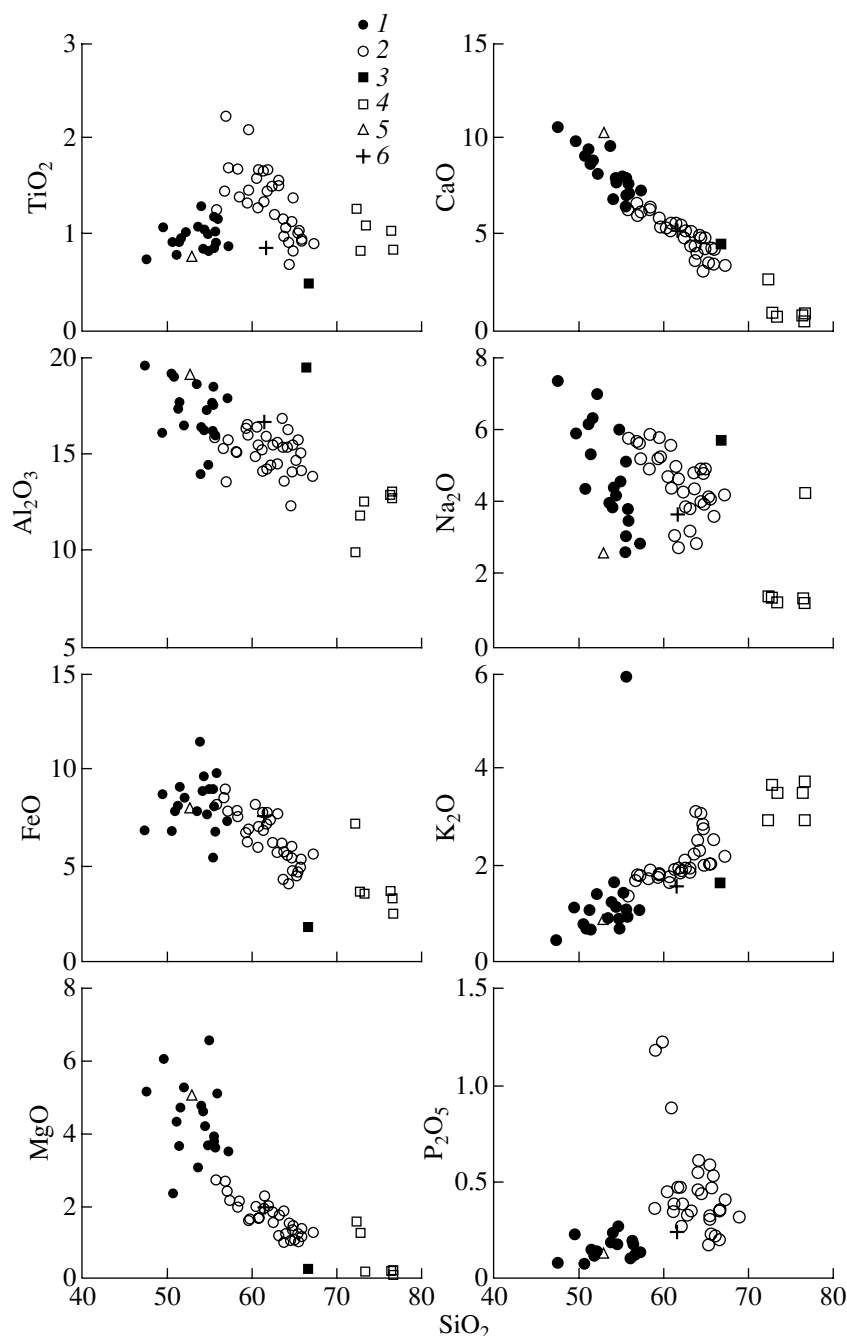


Рис. 2. Вариационные диаграммы “ SiO_2 – петрогенные элементы”.

1, 2 – составы расплавных включений во вкрапленниках базальта (1) и андезитов (2); 3, 4 – составы стекла основной массы базальта (3) и андезитов (4); 5, 6 – составы пород: базальта (5) и андезитов (6).

ральского рудного района (Южный Урал) [12]. Сравнительно высока в расплаве базальта Карымского вулканического центра концентрация S – от 0.07 до 0.22% при средней величине 0.14%.

Содержание SiO_2 в стеклах расплавных включений в образцах андезитов (55.7–67.1%) в среднем на 9% выше, чем во включениях образца базальта. Для расплавов андезитов характерны высокие содержания FeO (от 9.0 до 4.1% при среднем

6.5%), CaO (в среднем 5.2%) и обычные содержания Na_2O (4.5%) и K_2O (2.1%). Концентрация Cl в расплаве значительно возросла (в среднем до 0.26%), а концентрация S уменьшилась (в среднем до 0.07%).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

К самым значительным вопросам, возникшим после получения данных по расплавным включе-

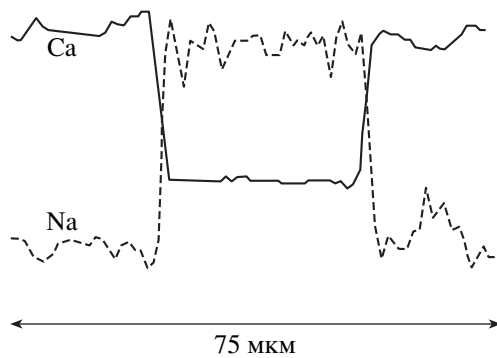


Рис. 3. Профиль сканирования электронным пучком через расплавленное включение в плагиоклазе базальта (табл. 5, анализ № 6).

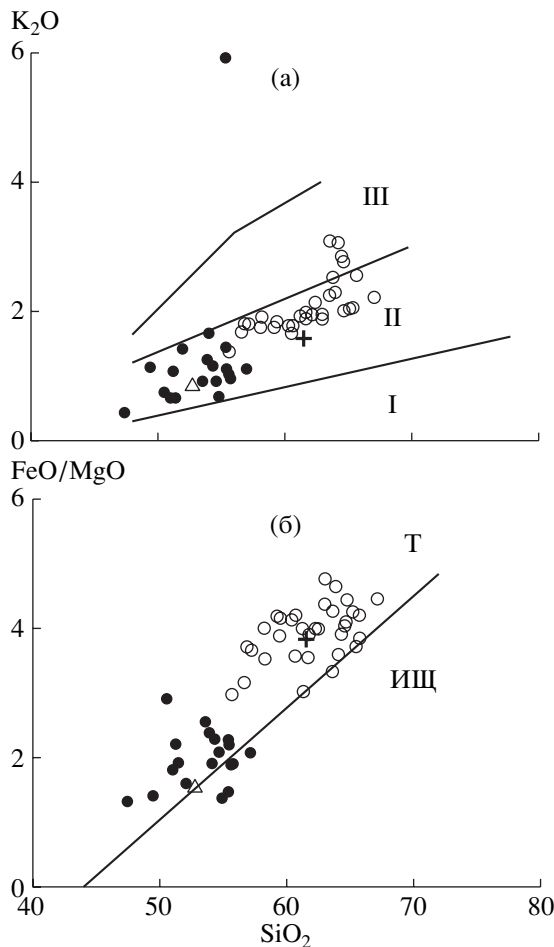


Рис. 4. Классификационные диаграммы разделения вулканических серий: а – по содержанию K_2O (I, II, III – низкокалийевая, среднекалийевая и высококалийевая серии, соответственно), б – по FeO/MgO отношению (Т – толеитовая серия, ИЩ – известково-щелочная серия). Условные обозначения даны к рис. 2.

ниям в образцах Карымского вулканического центра, можно отнести следующие:

1 – каково происхождение обогащенных натрием основных расплавов, обнаруженных в плагиоклазах базальта?

2 – являются ли андезитовые расплавы Карымского вулкана прямыми дифференциатами базальтовых расплавов?

3 – каково соотношение между расплавами Карымского вулкана и расплавами других вулканов Камчатки?

1. В первую очередь привлекает внимание то, что самые высокие содержания Na_2O (7.4–5.3%) установлены в самых основных по SiO_2 (47.4–52.0%) расплавах Карымского вулкана. При этом высокотемпературные стекла зафиксированы в основном плагиоклазе (An_{81-92}). Какие-либо обменные реакции в системе “минерал–расплав”, происходившие после захвата включения, по-видимому, можно исключить. Об этом свидетельствуют профили сканирования, полученные по нескольким включениям (рис. 3), которые указывают на однородность содержаний Ca и Na по площади и на отсутствие широких кайм около включений.

Базальтовый расплав кроме высоких содержаний натрия характеризуется и высоким отношением Na_2O/K_2O , равным в среднем 5.1, при этом по содержанию K_2O расплавы расположены в среднекалийевой серии (рис. 4а). Такие же высокие содержания натрия и сходные отношения Na_2O/K_2O в расплавах были обнаружены ранее при изучении ксенолитов Монголии и Йемена [13, 14]. Стекла в перидотитовых ксенолитах из щелочных базальтов Монголии [13] содержат 51.8–57.0% SiO_2 и 6.8–10.6% Na_2O , отношение $Na_2O/K_2O = 4.5–17.2$ при средней величине 8.6 (19 определений). Стекла, обнаруженные в шпинелевых перцолитах из Йемена [14], содержат 50.0–55.8% SiO_2 , 5.9–8.9% Na_2O , а отношение $Na_2O/K_2O = 7.5–14.1$ при средней величине 9.7 (15 определений). Генезис подобного рода расплавов авторам этих статей представляется проблематичным. Возможно определенную роль здесь играет мантийный метасоматоз, обусловленный воздействием натрового мантийного флюида, обогащенного редкими элементами средней степени несовместимости (там, где их содержания анализировались, отмечено относительное их обогащение). Для подтверждения такого заключения для базальтовых расплавов Карымского вулканического центра, необходимо проанализировать спектр редких элементов.

2. При рассмотрении соотношений расплавов основного и среднего составов в продуктах извержения 1996 г. наблюдается двойственная картина. Во-первых, оба расплава относятся к одной и той же серии – среднекалийевым толеитам (рис. 4б). Четкие тренды с отрицательной корреляцией $SiO_2-Al_2O_3$, SiO_2-FeO , SiO_2-MgO , SiO_2-CaO (рис. 2), SiO_2-An (рис. 5а), положительной корреляцией SiO_2-K_2O (рис. 2) могут свидетельствовать о тесном генетическом родстве между этими расплавами. Однако на других диаграммах отражены

иные зависимости. Так, например, содержание титана в большинстве расплавных включений в андезитах почти в полтора раза больше, чем в стеклах основного состава. Также не типична отрицательная корреляция $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ (рис. 2), причем можно заметить на этом графике две четкие ветви, характеризующие базальтовый и андезитовый расплавы соответственно. Столь же неожиданной выглядит положительная корреляция на диаграмме зависимости $\text{CaO--Na}_2\text{O}$ (рис. 5б). Таким образом, для корректного выявления степени родства андезитовых и базальтовых расплавов необходима детализация исследований, и в первую очередь – определения содержаний редких элементов.

3. Сравнение составов расплавных включений в андезитах Карымского вулкана с ранее изученными нами на тех же приборах и по аналогичной методике составами расплавных включений в андезитах других вулканов Камчатки – Шивелуча и Безымянного [15–17] – подтвердило своеобразие лав Карымского вулкана (рис. 6). На рисунке изображены поля составов расплавов этих трех вулканов, средние значения для каждого поля и средние составы пород. Отчетливо видно, что в среднем расплавы Карымского вулкана более основные, обогащены титаном, железом, магнием, кальцием и фосфором. Что касается щелочей, то содержание Na_2O сопоставимо с таковым в расплавах Шивелуча и Безымянного, в то время как содержание K_2O в расплавах Карымского вулкана значительно ниже, чем в расплавах остальных вулканов. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что андезитовые расплавы Карымского вулкана – наименее дифференцированные из рассматриваемых трех вулканов. Это подтверждается и незначительным расстоянием между фигуративными точками расплава и породы на рис. 6, в то время как для остальных вулканов эти расстояния весьма значительны.

Итак, вулкан Карымский характерен тем, что составы расплавов и пород здесь практически совпадают (это относится и к основным, и к средним породам), за исключением очень высоких содержаний натрия в некоторых расплавных включениях в базальтах. Эти особенности – сходство составов расплавов и пород, а также отсутствие кислых расплавов – отличают вулкан Карымский от других рассмотренных вулканов Камчатки. Специфичным для Карымского вулкана является присутствие натровых расплавов необычного состава во вкрапленниках основных плагиоклазов в базальте. Базальтовые и андезитовые расплавы Карымского вулканического центра, вероятно, связаны генетически на уровне глубинного очага. Однако точнее определить их взаимосвязь не представляется возможным до получения точных данных по содержаниям редких элементов в тех и других расплавах.

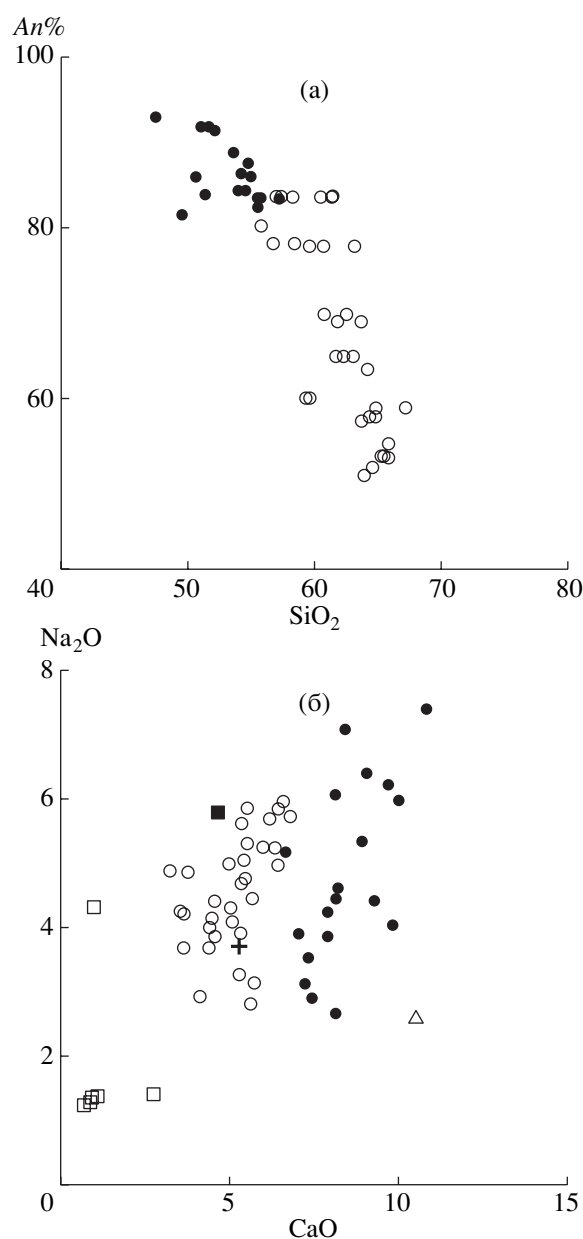


Рис. 5. Диаграммы зависимостей: а – содержание SiO_2 в расплавных включениях – состав плагиоклаза-хозяина, б – содержания $\text{CaO--Na}_2\text{O}$. Условные обозначения даны к рис. 2.

ВЫВОДЫ

1. Определены составы расплавных включений во вкрапленниках базальта кальдеры Академии Наук (прорыв Новогодний, озеро Карымское) и андезитов вулкана Карымский (Камчатка) последнего извержения 1996 г. Расплавы базальта ($\text{SiO}_2 = 47.4\text{--}57.1$ мас. % по данным 21 включения) характеризуются обычными содержаниями FeO (11.4–6.8%), MgO (6.1–2.3%), CaO (10.8–6.7%), TiO_2 (1.3–0.7%), но значительно обогащены Na_2O (7.4–2.9% при среднем 5.1%). При этом самые вы-

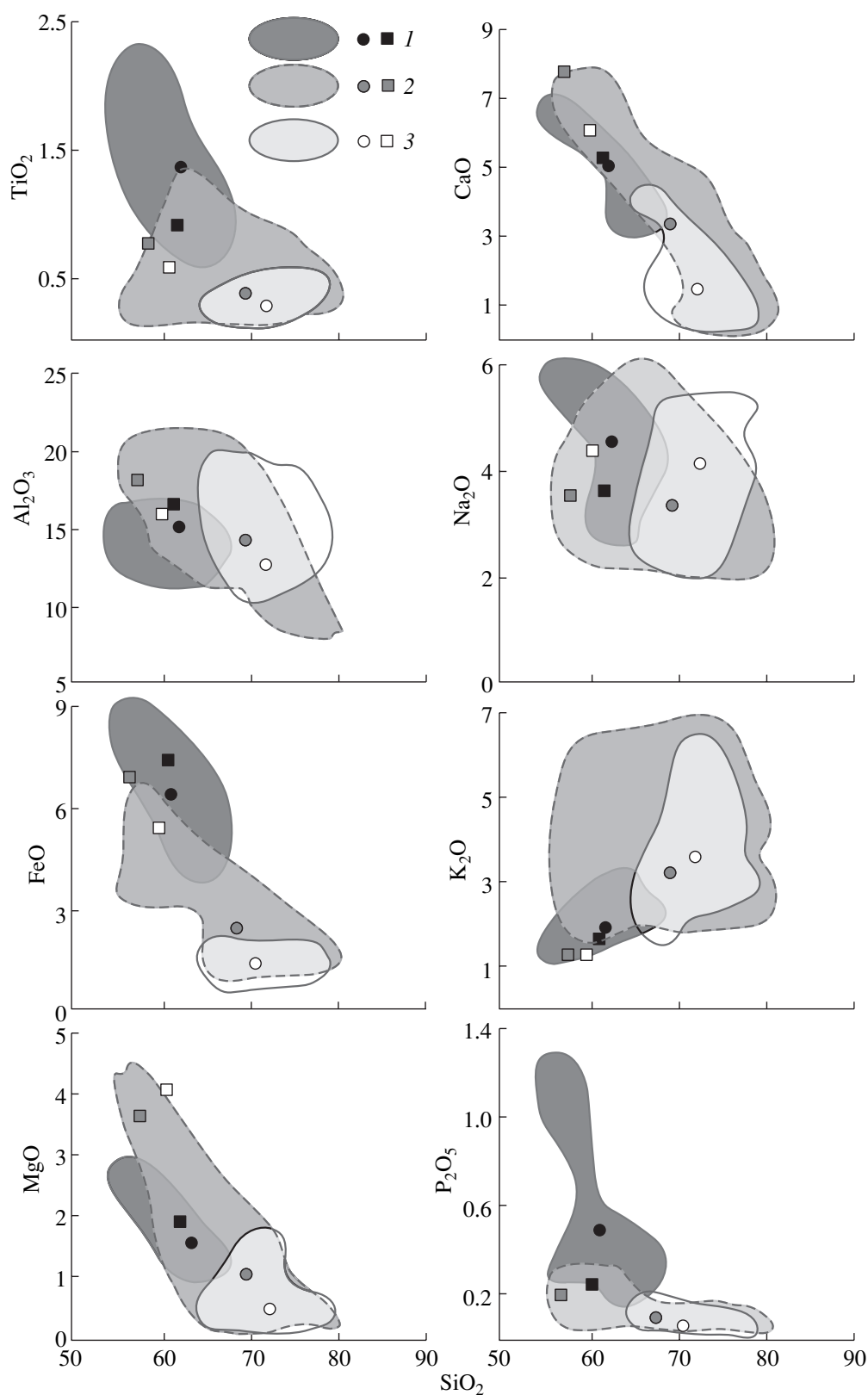


Рис. 6. Сравнение составов пород (андезитов) и расплавных включений трех вулканов Камчатки: Карымского (1), Безымянного (2) и Шивелуча (3).

Поле – область составов расплавных включений, кружок – среднее значение составов расплавных включений, квадрат – средний состав пород (андезитов).

сокие содержания Na_2O (7.4–5.3%) установлены в самых основных по SiO_2 расплавах (47.4–52.0%). Содержания K_2O изменяются от 0.4 до 1.7%. Для расплавов андезитов ($\text{SiO}_2 = 55.7\text{--}67.1$ мас. % по данным 33 включений) характерны высокие содержания FeO (в среднем 6.5%), CaO (5.2%) и обычные содержания Na_2O (4.5%) и K_2O (2.1%).

2. Определены концентрации летучих в расплавах: в базальтовом расплаве в среднем содержится 0.09 мас. % Cl и 0.14 мас. % S , в андезитовом расплаве концентрация Cl возрастает в среднем до 0.26 мас. %, а концентрация S уменьшается в среднем до 0.07 мас. %.

3. Проведено сравнение составов расплавов андезитов вулкана Карымский с ранее изученными нами по аналогичной методике расплавами андезитов вулканов Шивелуч и Безымянный (Камчатка). Установлено существенное различие магматических расплавов этих вулканов: на Карымском вулкане расплавы более основные, обогащены титаном, железом, магнием, кальцием, фосфором, натрием и значительно беднее калием, чем расплавы вулканов Шивелуч и Безымянный. Повидимому, расплавы Карымского вулкана являются менее дифференцированными по сравнению с расплавами вулканов Безымянный и Шивелуч.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 98-05-64491 и 97-05-64541), Государственной научно-технической программы России "Глобальные изменения природной среды и климата" (проект 1.2.2.) и проекта 96-15-98442 (Научные школы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Б.В. Извержение Карымского вулкана в 1962–1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 135 с.
2. Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3–37.
3. Озеров А.Ю. Динамика извержения Карымского вулкана (Камчатка) в 1996 г. и состав его продуктов // Вестник ДВО РАН. 1997. № 3. С. 86–93.
4. Гриб Е.Н. Петрология продуктов извержения 2–3 января 1996 г. в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 71–96.
5. Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура) / Под ред. Масуренкова Ю.П. М.: Наука, 1980. 299 с.
6. Бакуменко И.Т. Исследование стекловатых и раскристаллизованных включений в магматических минералах // Проблемы петрологии и генетической минералогии. М.: Наука, 1970. Т. 2. С. 259–272.
7. Ильин А. Г., Красов Н.Ф. Температурные особенности кристаллизации вкрапленников плагиоклаза в лавах Карымского вулкана, различающихся по степени газонасыщенности // Термобарогеохимия и генетическая минералогия. Новосибирск, 1975. С. 37–46.
8. Красов Н.Ф. О кристаллизации лав андезитовой формации Камчатки по данным исследования расплавных включений в минералах // Термобарогеохимия земной коры и рудообразование. М.: Наука, 1978. С. 68–72.
9. Красов Н.Ф., Клоккьятти Р. Ликвация силикатного расплава и ее возможная петрогенетическая роль по данным изучения расплавных включений // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 1. С. 201–204.
10. Наумов В.Б. Термометрическое исследование включений расплава во вкрапленниках кварца кварцевых порфиров // Геохимия. 1969. № 4. С. 494–498.
11. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н. Три типа расплавов, участвовавших в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) // Геохимия. 1997. № 4. С. 391–397.
12. Наумов В.Б., Карпущина В.С., Баранов Э.Н., Кононкова Н.Н. Составы расплавов, содержания летучих компонентов и элементов-примесей температуры кристаллизации кварца кислых вулканитов Верхнеуральского рудного района (Южный Урал) // Геохимия. 1999. № 4. С. 339–351.
13. Ionov D.A., Hofmann A.W., Shimizu N. Metasomatism-induced melting in mantle xenoliths from Mongolia // J. Petrol. 1994. V. 35. P. 753–785.
14. Chazot G., Menzies M., Harte B. Silicate glasses in spinel lherzolites from Yemen: origin and chemical composition // Chemical Geology. 1996. P. 159–179.
15. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д. и др. Состав расплава и условия кристаллизации андезитов вулкана Шивелуч (Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Докл. РАН. 1998. Т. 359. № 5. С. 676–679.
16. Tolstykh M.L., Naumov V.B., Babanskii A.D. et al. Chemical composition, trace elements, and volatile components of melt inclusions in minerals from andesites of the Shiveluch Volcano, Kamchatka // Geochemistry International. 2000. V. 38. Suppl. 1. P. S123–S132.
17. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Богоявленская М.Л., Кононкова Н.Н. Андезит-дацит-риолитовые расплавы при кристаллизации вкрапленников андезитов вулкана Безымянный, Камчатка // Геохимия. 1999. № 1. С. 14–24.